

Universidad Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales



**Modelización numérica del
comportamiento frente a impacto de
polímeros frágiles: Aplicación a la
protección de teléfonos móviles**

Autor: Alfonso Bautista Salinero

Tutor: Ángel Arias Hernández

Madrid, 2014





AGRADECIMIENTOS

Éste trabajo fin de grado simboliza el fin de una parte muy importante de mi vida. Dura pero con recompensas. Por eso quiero ocupar este espacio agradeciendo a algunas de las personas que me han ayudado a llegar hasta aquí.

Quiero agradecer a todos mis amigos que han estado soportando batallitas y problemas durante todos estos años.

También quiero agradecer a mi familia el apoyo y ánimo que me han dado siempre para permitirme llegar a este punto de mi vida.

Por último quiero agradecer a la mayor responsable de que haya llegado hasta aquí todo el apoyo, cariño y comprensión que me ha prestado para hacerlo posible. Sin ti todo esto habría sido mucho más difícil. Muchas gracias por todo Aida.



RESUMEN

En el mundo globalizado de hoy, donde la rapidez de la llegada de nuevos productos al mercado es fundamental, el uso de herramientas numéricas es totalmente necesario como elemento que permita limitar el tiempo que un producto permanece en la fase de diseño. Para una correcta predicción de los modelos numéricos, se hace necesario utilizar ecuaciones constitutivas adecuadamente validadas que arrojen resultados veraces. En éste trabajo fin de grado se ha llevado a cabo una modelización del comportamiento de un polímero termoplástico frágil, en este caso el policarbonato, para considerar su aplicación como elemento de protección de dispositivos móviles con partes transparentes y propensas a la rotura y ralladuras (Teléfonos móviles, visores transparentes, cascos, lunas de automóviles y aeronaves, ventanas, ventanillas...).

Para la modelización polímeros termoplásticos se ha hecho empleo de las ecuaciones constitutivas de Johnson-Cook y de Drucker-Prager, y tras comentar las características de cada modelo, se han comparado los resultados de las predicciones que aporta cada ecuación constitutiva en distintos ensayos con condiciones variantes de velocidad de deformación y presión de confinamiento, siguiendo una configuración experimental de referencia usada en la bibliografía que ayuda a simular las condiciones que se dan en situaciones de impacto.

Se ha desarrollado una herramienta de análisis numérico del comportamiento de distintos polímeros en condiciones de confinamiento que ayuda en la toma de decisiones y conclusiones en lo que respecta a la validez de los distintos modelos de comportamiento.

Finalmente se analizan las diferencias en los resultados de cada modelo y se decide no aconsejar la implementación del modelo Johnson-Cook en problemas de impacto para polímeros termoplásticos.



ABSTRACT

In today's globalized world, where a small time-to-market is fundamental, the use of numeric tools is absolutely necessary as an element to help diminish the time a product spends in the design phase. For an accurate prediction of the numeric models, it becomes necessary the use of constitutive equations adequately validated. In this bachelor thesis a modelization of the behavior of a fragile thermoplastic polymer, polycarbonate has been used in this case, has been done, to consider its use as a protective element in mobile devices with transparent parts that can be subject to scratches or shatter (Smartphones, visors, helmets, cars and airplanes windows...)

For the modelization of fragile thermoplastic polymers, Johnson-Cook and Drucker-Prager constitutive equations have been used, and after an overview of each model, predictions obtained with each model have been compared under varying conditions of strain rate and confining pressure, following an experimental configuration of reference used in the bibliography that helps simulate the conditions occurring in an impact problem.

A numerical analysis tool has been developed to help with the conclusions and decision making about the validity of different behavior models for various polymers under confinement conditions.

Lastly, the differences between both models are analyzed and it's decided not to recommend the implementation of the Johnson-Cook model in thermoplastic polymers for impact problems.





ÍNDICE

Agradecimientos	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
Capítulo 1. Motivación, antecedentes, objetivos y actividades	10
1.1 Motivación	10
1.2. Marco genérico.....	10
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	12
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	12
1.4 Metodología	12
Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE	16
2.1 El método de elementos finitos como herramienta de modelización.....	16
2.1.1 <i>El método en la actualidad</i>	18
2.2. Avances estructurales en la tecnología móvil.	18
2.3 Polímeros termoplásticos	19
2.3.1 <i>Modelización de polímeros termoplásticos</i>	19
2.3.2 <i>Aplicaciones de polímeros termoplásticos</i>	20
Capítulo 3. Modelización del comportamiento mecánico	22
3.1 Modelos de Plasticidad para polímeros termoplásticos	22
3.1.1 <i>Variantes e invariantes de la matriz de tensión y la influencia de la presión</i>	22
3.1.2 <i>Modelo Drucker-Prager</i>	23
3.1.3 <i>Modelo Johnson-Cook J2</i>	24
3.1.4 <i>Comparación de ecuaciones constitutivas</i>	25
3.2 Modelos de plasticidad para metales	26
Capítulo 4. Configuración experimental de referencia.....	27
Capítulo 5. Desarrollo numérico del comportamiento mecánico	30
5.1 INTRODUCCIÓN.....	30
5.2 Tipo de análisis	30
5.3 Propiedades del mallado	30
5.4 Propiedades del material	31
5.5 Condiciones de Contorno	32
Capítulo 6. Comparación y validación de modelos numéricos	34
6.1 ecuación constitutiva de Johnson-cook para el policarbonato	35
6.2 Configuraciones analizadas	35
Capítulo 7. Análisis de Resultados y aplicación del modelo numérico.....	37
7.1 Policarbonato	37



7.2 Extensión del problema a otro polímero termoplástico: ABS	38
Capítulo 8. Conclusiones y trabajos futuros	42
8.1 Conclusiones	42
8.2 Trabajos Futuros	43
Apéndice I: Presupuesto.....	44
Recursos humanos	44
Material utilizado	45
Bibliografía	47



LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Estructura molecular de un polímero semicristalino y de un polímero amorfo.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. Diagrama esquemático de las tareas a realizar para la implementación de la metodología.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3. Resistencia de una probeta de hormigón frente a la presión. (Forquin, Arias, & Zaera, 2008).....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4. Esquema de la configuración utilizada, con sistemas de referencia.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 5. Ensayo cuasiestático durante su ejecución.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 6. Mallado con elementos cuadriláteros.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 7. Ensamblaje final del modelo.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 8. Velocidades de entrada y salida para casos dinámicos. Para la configuración 4 el caso a) y para la configuración 3 el caso b). (Rittel & Dorogoy, A methodology to assess the rate and pressure sensitivity of polymers over a wide range of strain rates, 2008).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 9. Curvas utilizadas para validar el modelo. a) ensayo a baja velocidad de deformación. b) ensayo a alta velocidad de deformación.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 10. Curvas tensión verdadera - Deformación verdadera para las cuatro configuraciones según los modelos de DP y de JC.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 11. Espécimen deformado según el modelo DP.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 12. Espécimen deformado según el modelo JC.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 13. Curvas de Tensión verdadera - Deformación verdadera de las cuatro configuraciones para el ABS.....</i>	<i>40</i>



LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Propiedades mecánicas de los distintos materiales de camisa y actuador.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 2. Propiedades mecánicas para el Policarbonato.</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3. Parámetros de Johnson-Cook para el policarbonato según Dwivedi et al....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 4. Resumen de configuraciones analizadas</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 5. Parámetros del modelo Drucker-Prager para el ABS.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 6. Parámetros del modelo de Johnson-Cook para el ABS</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 7. Desglose aproximado de las horas dedicadas por el autor</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 8. Coste de recursos humanos en el proyecto</i>	<i>45</i>

CAPÍTULO 1. MOTIVACIÓN, ANTECEDENTES, OBJETIVOS Y ACTIVIDADES

1.1 MOTIVACIÓN

El modelado de materiales frágiles frente a impacto tiene un gran interés. Con la popularización de los teléfonos inteligentes que disponen de grandes pantallas de vidrio, surge la necesidad de disminuir el número de fallos por impacto, que generan daños de gran coste para el usuario. Aplicando una lámina de polímero por encima del vidrio que absorba parte del impacto, puede aumentarse la energía de impacto necesaria para la fractura, disminuyendo el número de fallos producidos por pequeñas caídas o golpes. Aunque se plantea un problema concreto estudiando un policarbonato, se puede aplicar a multitud de casos donde una superficie de vidrio pueda llegar a fracturarse por impacto durante el uso diario, como por ejemplo la esfera de un reloj o el cristal de unas gafas, aparte de cualquier tipo de dispositivo con pantalla, como tablets o libros electrónicos.

Además, el uso de polímeros frágiles que absorban energía durante impactos tiene un gran recorrido, como por ejemplo el polímero ABS, que se utiliza en cascos protectores, en palos de golf o paragolpes de automóviles, o el PEEK que aunque actualmente se utiliza en rodamientos o pistones por sus altas propiedades mecánicas, podría llegar a utilizarse como blindaje en vehículos.

1.2. MARCO GENÉRICO

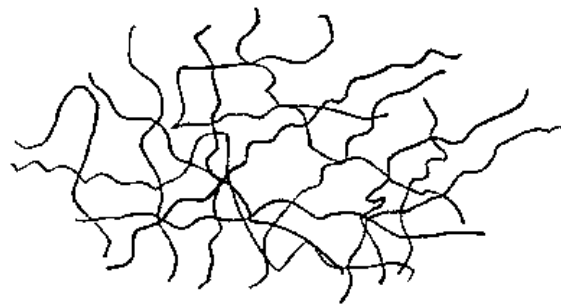
Los polímeros son materiales compuestos de largas cadenas de moléculas donde se repiten subunidades llamadas monómeros. Los polímeros se clasifican normalmente en dos grandes familias, termoplásticos y termoestables, si al aumentar su temperatura, fluyen –pasan a estado líquido– o no (Los termoplásticos fluyen y los termoestables no). Los polímeros que interesan para estas aplicaciones son los termoplásticos, ya que por lo general son frágiles, aunque hay que mencionar que el tipo de rotura depende de la temperatura.

Los polímeros termoplásticos están divididos según como estén estructuradas las cadenas de monómeros en su interior, y pueden ser amorfos si no tienen ningún tipo de ordenamiento, o semicristalinos si se dan las condiciones para que en ciertos lugares se ordenen de manera compacta y ordenada (Figura 1). Los polímeros termoplásticos cristalinos como el PEEK, aunque con muy buenas propiedades mecánicas, son

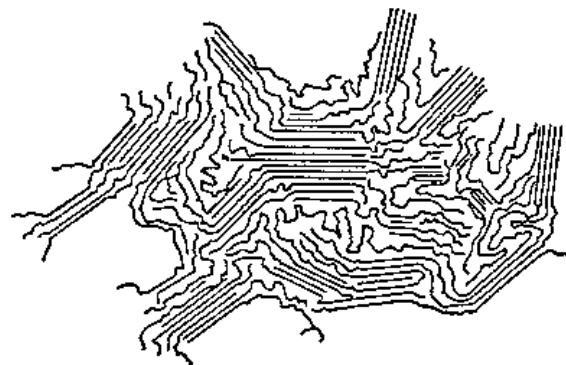
siempre opacos, por lo que ven sus aplicaciones limitadas a situaciones donde no es necesaria la visión a través del polímero.

El polímero que se va a analizar en este trabajo, es el policarbonato, ya que su tecnología de fabricación está ampliamente desarrollada, y es un producto con amplia presencia en el mercado comercial, donde tiene un gran número de usos y aplicaciones en el mundo de la telefonía móvil, ya que se puede encontrar desde protectores antirayaduras hasta carcasas para limitar el daño en una caída, e incluso en el propio chasis del teléfono. El policarbonato es un polímero termoplástico de estructura amorfa, que se sintetiza de la reacción del bisfenol A y del fosgeno. Se produce de varias formas, en forma de películas o films o en forma de planchas, siendo esta última la que se utiliza en la construcción, ya que se puede utilizar en superficies rectas o curvas y puede obtenerse en distintos grados de transparencia y colores.

Para el modelado mediante elementos finitos, se utilizará el software comercial ABAQUS, ya que es ampliamente utilizado en el mundo académico y en los sectores automovilístico e industrial.



Polímero de estructura amorfa



Polímero de estructura cristalina

FIGURA 1. ESTRUCTURA MOLECULAR DE UN POLÍMERO SEMICRISTALINO Y DE UN POLÍMERO AMORFO



1.3 OBJETIVOS

Dada la importancia de desarrollar nuevos materiales que soporten mejor las condiciones de choque a las que se someten ciertos objetos de uso diario como los smartphones, y dado el amplio volumen de negocios en el que existen vidrios que necesitan de protección y resistencia como relojes, pantallas de protección de cascos o incluso elementos arquitectónicos como escaleras o balaustradas, se hace necesario desarrollar modelos matemáticos de simulación predictivas que ahorren tiempo y dinero en situaciones de resistencia al choque. Para minimizar el coste temporal y computacional del desarrollo de cada estudio es deseable utilizar modelos ya implementados en el software de elementos finitos.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Como objetivo de este trabajo fin de grado, se intentará identificar las propiedades mecánicas y características técnicas de los materiales que se utilizan a día de hoy en la industria, tanto de componentes intrínsecos de la pantalla como de elementos protectores de pantalla de fácil recambio basados en el policarbonato. Asimismo se desarrollará una metodología numérica-experimental para determinar la adecuación de diferentes leyes de comportamiento empleadas en la modelización de polímeros en aplicaciones de impacto. También se investigará que hipótesis son válidas y que condiciones de contorno han de utilizarse.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Específicamente se va a desarrollar un modelo numérico para el material que se ha destacado como óptimo, el policarbonato. Este modelo se va a validar con un modelo publicado en una revista científica, y se va a utilizar como base para comparar los resultados de distintos casos. Se van a comparar 2 leyes de endurecimiento distintas, Drucker-Prager y Johnson-Cook, ya que aunque el Drucker-Prager es una ley más adecuada para la utilización en polímeros frágiles, el modelo de Johnson-Cook es ampliamente utilizado por su simplicidad.

1.4 METODOLOGÍA

Se ha implementado una metodología experimental y numérica mediante la realización de las siguientes actividades:

- Búsqueda en la bibliografía según la ley de comportamiento a utilizar.
- Análisis del tipo de ensayo a realizar.



-Realización de ensayos experimentales o simulaciones según modelos validados.

-Análisis de las variables a analizar durante los ensayos y simulaciones para validar el modelo y obtener conclusiones.

Para facilitar la tarea de implementar el trabajo aquí propuesto, se presenta en la página siguiente el diagrama de flujo que se ha de seguir para la realización del análisis a realizar.

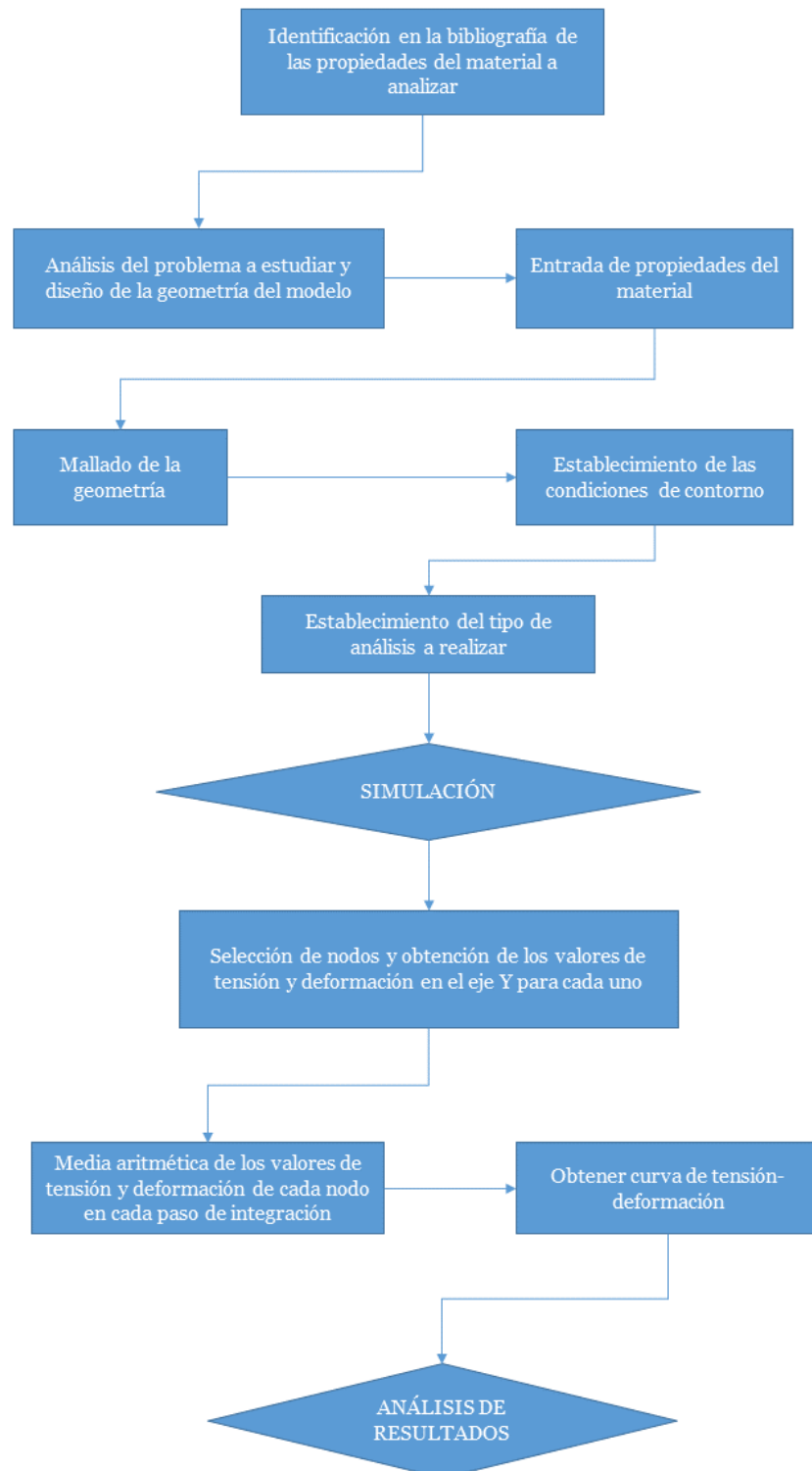


FIGURA 2. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LAS TAREAS A REALIZAR PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA.



En relación al desarrollo del modelo numérico, se han de recoger las siguientes variables de entrada y salida:

VARIABLES DE ENTRADA:

- Propiedades de los materiales a utilizar, según el modelo de plasticidad que se desee analizar.
- Geometría del problema.
- Condiciones de contorno.
- Tiempo de simulación.

VARIABLES DE SALIDA:

- Valores de tensión y deformación en dirección del eje longitudinal del espécimen para cada nodo seleccionado. En este caso tras el tratamiento realizado a los datos se ha obtenido una sola serie de datos que se ha graficado en una curva de tensión deformación para facilitar el análisis de los resultados.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS COMO HERRAMIENTA DE MODELIZACIÓN.

En 1956, con un artículo publicado en la revista *Journal of Aeronautical Science*, Turner, Clough, Martin y Topp, y uniendo avances realizados en múltiples campos por múltiples personas, se dio a conocer al mundo lo que ha llegado a ser conocido como método de los elementos finitos. Nacido en la sede de Boeing en Seattle y bajo el nombre de método matricial de la rigidez, comenzó como un método para calcular las vibraciones que ocurrían en una aeronave con ala delta. Al obtener malos resultados con una simplificación del ala mediante vigas unidimensionales, Clough, a la sugestión de Turner, modelizó la superficie alar en elementos placa de dos dimensiones interconectados en las esquinas. (Clough, 2004)

Pero no solo Turner y Clough son los pioneros del método de los elementos finitos –MEF–, también contribuyen al desarrollo matemático del método B. M. Irons, quien inventa los modelos isoparamétricos o las funciones de forma entre otras cosas, R. J. Melosh, quien reconoció y la importancia del trabajo de Rayleigh-Ritz y sistematizó la derivación variacional de elementos de rigidez; y E. L. Wilson, quien desarrolló el primer programa de software libre dedicado a la resolución de problemas mediante el MEF.

El problema que ha de solucionarse al discretizar de tal manera una superficie continua es un problema matricial de ecuaciones diferenciales, donde conociendo la rigidez de la estructura se desean conocer los desplazamientos que sufre al actuar sobre dicha estructura una fuerza, y se esquematiza en la siguiente fórmula:

$$f = K \cdot u \quad (1)$$

Aunque la solución que se obtiene de esta ecuación puede ser exacta según el método que se utilice para resolver el sistema matricial, el número de operaciones que se necesitan realizar es muy elevado, así que durante los primeros años la utilización del método queda restringida a grandes empresas del ámbito industrial y agencias gubernamentales de EEUU, ya que son las que tienen los recursos necesarios para permitirse los primeros ordenadores que son capaces de realizar en mucho menos tiempo la gran cantidad de operaciones necesarias. Es por ésto por lo que no es coincidencia de muchos de los pioneros del método, entre los que se encuentran los ya



nombrados, trabajen al menos durante parte de su carrera en la industria aeroespacial. (Felippa, 2004)

Con la popularización de los ordenadores en la década de los años 60, llega la posibilidad de efectuar la gran cantidad de cálculos necesarios con una mayor facilidad, lo que permite que durante esa década se popularice el método. También en esta década se continúa ampliando la extensión del método y los campos de estudio, y la confirmación del método como una disciplina matemática formal, con la llegada en 1967 del libro de referencia, *“El método de los elementos finitos”* de Zienkiewicz.

A partir de entonces, el aumento de la bibliografía, la extensión del método a problemas no lineales, y la aplicación a problemas de dinámica de fluidos, electromagnetismo o transferencia de calor y la disponibilidad de los primeros software comerciales hacen del método lo que es hoy en día, una herramienta importantísima para la aplicación en la ingeniería y la física.

Entre los principales programas comerciales de elementos finitos, existen grandes nombres como ANSYS, ABAQUS o LS-DYNA. Dada la popularidad de ABAQUS en el ámbito académico por su amplia capacidad para modelar materiales, vamos a utilizar éste para el desarrollo de este trabajo.

El modelado de materiales frágiles presenta varios problemas desde punto de vista teórico. En teoría, se pueden calcular la rigidez de un material y su tensión de rotura conociendo el valor de la energía de enlace entre distintas moléculas, sin embargo, dada la estructura amorfa de la mayoría de materiales cerámicos y poliméricos, es muy común que esta resistencia teórica sea mucho mayor de la que se reproduce experimentalmente en ensayos de laboratorio, del orden de 100 veces mayor. Además, no todos los especímenes que se someten a ensayos destructivos presentan las mismas propiedades mecánicas y en general, la distribución que siguen estas propiedades es una distribución Weibull, donde por ejemplo, el límite elástico del vidrio normalmente supuesto de 70GPa, realmente significa que el 85% de las muestras de un mismo vidrio, tendrá una rigidez de al menos 70GPa. (Basu, Tiwari, Kundu, & Prasad, 2009)

Otro problema, es el problema de la fractura. Para materiales frágiles, la fractura suele ocurrir sin apenas deformación plástica antes de la rotura, por lo que es difícil de predecir y detectar. Por añadido, en el momento de modelar, es difícil definir el lugar y el momento donde ocurren las fracturas.

2.1.1 EL MÉTODO EN LA ACTUALIDAD

Con el avance en términos de hardware que han ocurrido en las últimas décadas, se da pie a que se desarrollen nuevas formulaciones del método de elementos finitos, que dan soluciones a casos más generales donde ocurren singularidades o inestabilidades. Por ejemplo el desarrollo de nuevos tipos de elementos para el método extendido de los elementos finitos –como el XFEM–, surge de la necesidad de aliviar algunos defectos en la presencia de discontinuidades, ya sean grietas o interfaces de materiales, y lo soluciona sin tener que actualizar la malla en cada paso de integración. (Yazid, Abdelkader, & Abdelmadjid, 2009)

Además del XFEM, han surgido muchas otras versiones del método, como el hp-FEM o métodos sin malla.

Actualmente el mundo de la simulación numérica por ordenador, está muy avanzada e integrada en la industria, sobre todo en las industrias punteras, donde existe mayor necesidad de innovación. Como por ejemplo en la industria aeronáutica o automovilística, donde cada vehículo recibe estudios tanto aerodinámicos como estructurales por medio del método de los elementos finitos.

2.2. AVANCES ESTRUCTURALES EN LA TECNOLOGÍA MÓVIL.

A principio de la década de los ochenta, se produjo la primera llamada realizada desde un teléfono móvil, desde entonces el crecimiento del número de teléfonos móviles ha sido exponencial e imparable. Por entonces, eran pocos, grandes y caros. Con la llegada de la segunda generación de los teléfonos analógicos, el número de dispositivos llegó a los 200.000. De ahí al millón a principios de los noventa y hasta día de hoy, el aumento del número de teléfonos móviles ha sido imparable, llegando a haber más teléfonos móviles que habitantes desde el año 2006. (CNMC, 2014)

La evolución de la tecnología trajo el acceso a los Smartphone al público mayoritario en 2007 y 2008, con la presentación del iPhone de Apple, y la venta del primer Smartphone con Android respectivamente. En 2012 el número de smartphones en uso en todo el mundo ascendía hasta los mil millones, llegando en 2013 a la venta de mil millones de dispositivos en un solo año. (IDC, 2014)

Por su naturaleza mayoritariamente táctil, un Smartphone dispone de una pantalla táctil de gran tamaño, ocupando la mayor parte de la parte frontal del dispositivo. Durante el uso diario y normal del teléfono de una persona corriente, la pantalla se ve sometida a grandes exigencias, tales como contactos con partes punzantes, golpes o caídas. No es de extrañar por lo tanto, siendo el vidrio de la

pantalla una parte estructural importante del teléfono, y además frágil, que la rotura de la pantalla sea el mayor problema al que se enfrentan los usuarios. Según un estudio, en 2012 el 24% de los usuarios de iPhone tenían la pantalla fracturada (CNET, 2013). Además, debido al alto coste de reparación de la pantalla, alrededor del 40% del coste total del dispositivo, el porcentaje de personas que no arreglan el teléfono, es alto, alrededor del 11% (Squaretrade, 2012).

Por estos motivos, los fabricantes están en la búsqueda de nuevos materiales y construcciones que reduzcan la propensión de los teléfonos a romperse por la pantalla. Por ejemplo Samsung y LG han sacado hace poco al mercado dispositivos con una pantalla curva, con un display OLED flexible. Tradicionalmente, la pantalla de un Smartphone consta de un display o visualizador, que se monta sobre el chasis del teléfono, y un protector, que normalmente es algún tipo de vidrio.

De cara al futuro, existen dos ramas principales para minimizar las roturas de pantalla. Una es conseguir un vidrio que sea flexible de manera que tenga menor fragilidad, que es un área de investigación en la que está trabajando la marca Corning, fabricante del Gorilla Glass (Bloomberg, 2014). Su nuevo vidrio, el Willow Glass es un vidrio de tan solo 0.1 mm de espesor, por lo que se puede doblar y flexionar sin que se rompa. También LG y Samsung han sacado recientemente al mercado smartphones con pantallas curvas, que bajo ciertos esfuerzos, se doblan para evitar la rotura. Otra rama de investigación es conseguir un vidrio con mayor dureza, de manera que aunque aumente su fragilidad, su tensión de rotura sea mayor, con el vidrio de zafiro como principal estandarte (MacRumors, 2013).

2.3 POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

2.3.1 MODELIZACIÓN DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Para la modelización de polímeros termoplásticos existen una gran cantidad de modelos, maneras y características para ajustar los aspectos que sean necesarios para el problema planteado.

Lo importante es seleccionar los datos que sean de relevancia para el estudio, ya que aunque es posible obtener datos desde la variación del límite de fluencia con la temperatura, hasta las curvas SN de resistencia a fatiga, pasando por la amortiguación del material, no todos son necesarios para el mismo estudio.

La selección de las series de datos se ve muy influida por el tipo de modelo que se vaya a utilizar, ya que existen varios modelos principales: modelos elastoplásticos



con dependencia de la velocidad de deformación, modelos elastoplásticos con influencia de fluencia lenta o creep, modelos viscoelásticos no lineales. De nuevo, es importante elegir de manera correcta el modelo a usar, y calibrarlo según los datos que se tengan.

Además de los ya mencionados, existen otros modelos constitutivos más avanzados y específicos según la aplicación, como por ejemplo el modelo Bergström-Boyce para elastómeros, o los modelos Edward-Vilgis o de las tres redes.

También hay que mencionar el modelo de plasticidad propuesto por Ghorbel en (Ghorbel, 2008). Partiendo de la observación que la mayoría de modelos actuales predicen de manera correcta los resultados ensayos uniaxiales realizados en laboratorio, pero no las condiciones de tensión triaxial a la que los componentes están sometidos durante su vida en servicio. Éste modelo propone una función de plastificación generalizada deducida de los principios termodinámicos y variables internas del material para predecir de una mejor manera el comportamiento de materiales poliméricos durante la fase de servicio suponiendo el material isotrópico e homogéneo.

Sin embargo, es posible que no sea necesario irse a un modelo muy complicado, ya que rara vez estarán preimplementados en los softwares comerciales de elementos finitos, por lo que habrá que valorar si es necesario la programación de una subrutina de usuario donde se detallen minuciosamente cada aspecto de la ecuación constitutiva a utilizar o si es preferible calibrar un modelo para el estudio a realizar uno de los modelos ya implementados.

2.3.2 APLICACIONES DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Ya sea con objeto estructural, de protección, o simplemente ornamental, los polímeros encuentran cada vez un mayor uso en los objetos de uso diario sustituyendo a materiales más tradicionales. Un generalmente menor peso, junto a un menor coste de producción, todo ello unido a las investigaciones que permiten el aumento de las propiedades mecánicas, resistencia al fuego, impactos e incluso un aumento de la biocompatibilidad son las razones del aumento de su uso.

Las aplicaciones de este tipo de polímeros cubren un amplio rango, desde recipientes de uso alimenticio de polipropileno, hasta articulaciones artificiales o partes de chaleco antibalas realizadas en polietileno de ultra alta densidad.

Existen aplicaciones donde los requisitos de resistencia y durabilidad son altísimos, además de otros requerimientos, y que solo pueden ser satisfechas con cierto



tipo de polímeros, por ejemplo las cúpulas de los aviones de combate están hechas de polimetilmetacrilato, o el PEEK –polieter éter ketona-, que se utiliza en aplicaciones medicinales como implantes, e incluso tiene funciones estructurales en satélites espaciales (Lauzon, 2012).

CAPÍTULO 3. MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO

Para el modelado de materiales frágiles en el software de elementos finitos comercial ABAQUS, es de esperar que los resultados más fidedignos se obtengan de programar una subrutina de usuario, o VUMAT, donde se describan extensivamente la ecuación de estado del material, y los datos que lo caracterizan. Sin embargo, esto es una alternativa con un alto coste, ya que se requiere de tiempo y know-how para programar de manera satisfactoria la subrutina y de una gran cantidad de datos experimentales. Aquí se va a proponer un estudio de los distintos modelos de plasticidad ya preimplementados en ABAQUS, de los datos que se necesitan para la simulación con los distintos modelos, y en qué circunstancias puede ser correcta la suposición.

La configuración que va a usarse es de un cilindro confinado sometido a compresión a distintas velocidades de deformación, donde la presión de confinamiento sea la propia inducida por la deformación transversal que ocurre debida al coeficiente de Poisson. El motivo de esta configuración es que un material frágil sometido a esfuerzos de tracción, tiene una resistencia bastante limitada, siendo la resistencia a compresión del orden de 10 veces mayor a la resistencia a tracción.

3.1 MODELOS DE PLASTICIDAD PARA POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

3.1.1 VARIANTES E INVARIANTES DE LA MATRIZ DE TENSIÓN Y LA INFLUENCIA DE LA PRESIÓN

De forma genérica se puede escribir el tensor de tensiones, definido en las direcciones principales, de la siguiente manera, que teniendo en cuenta la ley de conservación del momento angular se puede concluir que es un tensor simétrico:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

El tensor σ_{ij} se puede descomponer como la suma de dos tensores:

-Un tensor de presión hidrostática o de tensión volumétrica $-\pi$ - que actúa de manera uniforme en las tres direcciones principales que modifica el volumen del cuerpo bajo tensión

$$\pi = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \quad (3)$$

-Otro tensor de tensiones desviadoras que modifica la forma, llamado s_{ij}

Que si $\sigma_{ij} = \pi \cdot I + s_{ij}$, se puede hallar s_{ij} de la siguiente manera:

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \pi \cdot I = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \pi & 0 & 0 \\ 0 & \pi & 0 \\ 0 & 0 & \pi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} - \pi & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - \pi & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} - \pi \end{pmatrix} \quad (4)$$

Operando matricialmente, se pueden definir los mismos 3 invariantes de la matriz desviadora $-J_1, J_2$ y J_3 - que posee una matriz diagonalizable de orden 3. El que más importancia tiene es el invariante J_2 . Es importante anotar que bajo esta notación, la tensión equivalente de Von Mises queda así:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sqrt{3 \cdot J_2} \quad (5)$$

Siendo σ_1, σ_2 y σ_3 las tensiones principales de σ_{ij} .

3.1.2 MODELO DRUCKER-PRAGER

El modelo de plasticidad propuesto por Drucker y Prager en 1952 surge de combinar la fricción de Coulomb con el criterio de plastificación de Von Mises. La superficie de plastificación representada en el espacio Haig-Wastergaard es un cono circular, donde el ángulo de la generatriz está relacionado con el ángulo de fricción interna, de tal manera que el ángulo es $\tan^{-1} \sqrt{3} \mu$. Las tensiones de fluencia a cortadura, a tracción y a compresión están relacionadas entre sí, ya que si el límite de plastificación a cortadura es k , los límites de plastificación a tracción y a compresión son $\sqrt{3}k/(1 + \mu/\sqrt{2})$ y $\sqrt{3}k/(1 - \mu/\sqrt{2})$ respectivamente, siendo μ el coeficiente de fricción (Lubliner, 1990). Proporcionada por (Bardia & Narasimhan, 2006), la función de plastificación de Drucker-Prager (DP de aquí en adelante) tiene la forma siguiente:

$$\Phi(\sigma_{ij}, \sigma_c) = \sigma_{eq} + p \tan \beta - \left(1 - \frac{1}{3} \tan \beta\right) \sigma_c = 0 \quad (6)$$

Donde $\sigma_c(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon})$ es la tensión verdadera de fluencia en compresión uniaxial, que es función de la deformación plástica equivalente y la velocidad de deformación. P es la presión hidrostática equivalente, σ_{eq} es la tensión equivalente de Von Mises y β es el ángulo de fricción, que indica la sensibilidad a la presión del material. La presión de confinamiento se puede calcular analíticamente, pero aquí se utilizará la presión de confinamiento media \hat{q} para una camisa cilíndrica elasto-plástica con radio interior a , espesor t y límite de fluencia σ_y calculada por (Rittel & Brill, 2008):

$$\hat{q} = \frac{1}{2}(q_{r=a} + q_{r=a+t}) = \frac{\sigma_y}{4} \left(1 - \left(1 + \frac{t}{a}\right)^{-2} + 2 \ln \left(1 + \frac{t}{a}\right)\right) \quad (7)$$

3.1.3 MODELO JOHNSON-COOK J2

Aunque el modelo de plasticidad Johnson-Cook (en adelante JC) es más adecuado para metales dúctiles que tienen una respuesta independiente a la presión hidrostática a la que están sometidos, se puede realizar una aproximación por un modelo J2 ya que es un modelo que está ampliamente implementado, del que existe una gran cantidad de documentación y que tiene en cuenta la dependencia que tiene el comportamiento de la velocidad de deformación. Los parámetros que se han de introducir en el software son los coeficientes A, B, n, m y las temperaturas de referencia y transición vítrea, y si existe dependencia de la velocidad de deformación, también el coeficiente C.

$$\sigma = [A + B(\varepsilon_p)^n] \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_p^{ref}}\right)\right] [1 + (T^*)^m] \quad (8)$$

Donde

$$T^* = \frac{T - T_R}{T_m - T_R} \quad (9)$$

Siendo T_m la temperatura de fusión y T_R una temperatura de referencia.

Sin embargo, a pesar de no ser el más apropiado para el modelado de polímeros frágiles, sí que es un modelo que se puede ver implementado en algún caso, como por ejemplo para el modelado del polímeros ABS en problemas de impacto (Louche, Pierre-Coudol, Arrieux, & Issartel, 2008).

Para obtener experimentalmente los parámetros, han de realizarse ensayos de tracción o compresión y realizar ajustes mediante regresiones lineales y exponenciales. Con ensayos a una sola velocidad de deformación $-\dot{\epsilon}_p^{ref}$ – se obtienen los parámetros A, B y n, siendo A el límite elástico. Con curvas de tensión-deformación a más velocidades de deformación se calcula el parámetro C. Y con curvas de ensayos a distintas temperaturas a una misma velocidad de deformación se obtiene el parámetro m.

3.1.4 COMPARACIÓN DE ECUACIONES CONSTITUTIVAS

Como ya se ha dicho en varias ocasiones, la diferencia que hace que un modelo pueda utilizarse para modelar polímeros y otro no es la influencia que tiene la presión en la llegada del límite a fluencia de los materiales poliméricos, como demostrado por ejemplo por (Cadell, Raghava, & Atkins, 1974).

El modelo DP, utilizando la formulación propuesta por Simon Rolshoven en (Patzák, 2014), tiene la función de plasticidad que aparece en la ecuación (10)

$$f(\sigma, \tau_Y) = F(\sigma) - \tau_Y \quad (10)$$

Donde τ_Y es el límite a fluencia bajo tensión tangencial pura, y σ el tensor de tensión. $F(\sigma)$ es la tensión equivalente con dependencia de la presión y tiene la siguiente forma:

$$F(\sigma) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} \quad (11)$$

Como se puede ver en la ecuación (11), la ecuación constitutiva de DP tiene una segunda parte que no depende de la presión, pero una primera que sí, ya que el primer invariante del tensor de tensiones es 3 veces la tensión volumétrica por la matriz identidad.

Por otra parte, el modelo JC parte de la premisa que la tensión equivalente de von Mises para la parte plástica de una curva tensión deformación tiene la forma de la ecuación (8). Sin embargo, ahí radica la diferencia, ya que el criterio de fluencia de von Mises postula que el material alcanza la fluencia cuando la tensión es igual a raíz de tres veces el segundo invariante de la matriz desviadora, es decir:



$$\sigma_y = \sqrt{3J_2} \quad (12)$$

Sin existir ningún tipo de dependencia de la presión hidrostática que el material sufre.

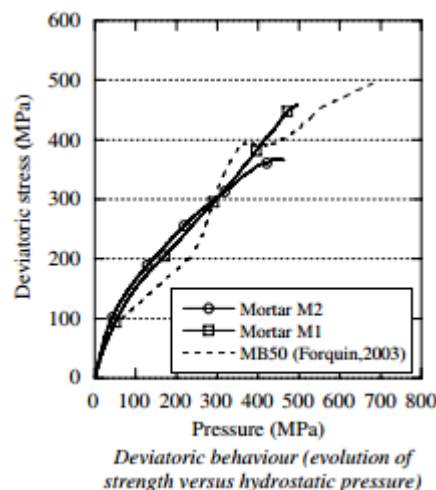
3.2 MODELOS DE PLASTICIDAD PARA METALES

Aunque existe una cantidad de modelos de plasticidad disponibles para metales, dada la relativa baja importancia de la ley de endurecimiento que siga el material de la camisa de compresión, se va a utilizar un modelo elástico perfectamente plástico, donde solo se introducirá el módulo elástico del material y su límite a fluencia. Se puede encontrar un resumen de los distintos materiales y sus propiedades en la Tabla 1.

CAPÍTULO 4. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL DE REFERENCIA.

Para analizar problemas de impacto existen una gran cantidad de ensayos que podrían utilizarse. Por ejemplo un ensayo de Taylor, donde el material a analizar se lanza a gran velocidad contra una superficie sólida o el ensayo Charpy, donde un peso golpea a gran velocidad una probeta del material a analizar.

Una de las características de un problema de impacto es que se alcanzan grandes presiones en una zona de contacto limitada –más limitada cuanto mayor sea la velocidad de impacto–. Es por esto que también en muchas ocasiones se utilizan los ensayos de compresión confinada. En estos ensayos el material sometido a compresión se deforma transversalmente y se encuentra con la camisa metálica que impide o dificulta la deformación. La presión hidrostática modifica el comportamiento y resistencia de los materiales sensibles a la presión. Un ejemplo muy claro de esto se puede ver en (Forquin, Arias, & Zaera, 2008), donde una probeta de hormigón, material sensible a la presión hidrostática, es sometido a compresión confinada, observando como la resistencia del material hasta puede cuadruplicarse como se ve en la Figura 3. Resistencia de una probeta de hormigón frente a la presión. Figura 3.



**FIGURA 3. RESISTENCIA DE UNA PROBETA DE HORMIGÓN FRENTE A LA PRESIÓN.
(FORQUIN, ARIAS, & ZAERA, 2008)**

Por ese motivo es habitual estudiar el comportamiento de los polímeros en camisas de confinamiento que aumentan las presiones a las que se somete el material, dando condiciones de contorno más parecidas a las que se alcanzan en procesos de impacto.

La configuración experimental que se va a utilizar es la propuesta por (Rittel & Dorogoy, A methodology to assess the rate and pressure sensitivity of polymers over a wide range of strain rates, 2008), donde un espécimen del material a analizar, se introduce en una camisa de confinamiento para aumentar la presión hidrostática que alcanza el polímero y se le somete a ensayos de compresión a diferentes velocidades de deformación con objetivo de determinar el efecto de dicha velocidad de deformación en la tensión máxima alcanzada. Se puede ver en la Figura 4 un esquema de la configuración y del sistema de referencia utilizado.

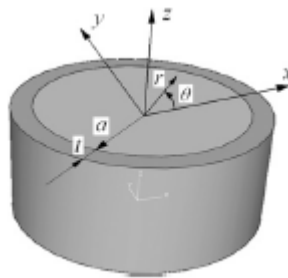


FIGURA 4. ESQUEMA DE LA CONFIGURACIÓN UTILIZADA, CON SISTEMAS DE REFERENCIA.

Tras una amplia búsqueda en la bibliografía se ha decidido utilizar ésta publicación ya que la configuración que utiliza es beneficiosa para las condiciones que se van a estudiar. Dispone de un gran número de curvas experimentales que se utilizan para validar el modelo, y la ecuación constitutiva que se usa es la de Drucker-Prager, que ya está convenientemente preimplementada en ABAQUS. Aparte de que el material utilizado es de los que más aplicaciones tienen en el mundo de la protección para impactos.

La variable de validación serán las propias curvas de tensión-deformación, que son las variables que se pueden obtener de los ensayos realizados en barra Hopkinson (SHPB). En un ensayo en SHPB, el espécimen es impactado por una barra que es propulsada mediante un canon de gas. El impacto produce una onda de tensiones que se propaga a través del material y es recogida en otra barra igual que la impactadora situada al otro lado del espécimen. Dado que ambas barras están provistas de galgas extensiométricas, las curvas de tensión deformación se pueden calcular suponiendo que la deformación en el espécimen es constante.



FIGURA 5. ENSAYO CUASISTÁTICO DURANTE SU EJECUCIÓN.

Como se puede ver en la Figura 5, al someterse a una presión de compresión, el espécimen sufre una deformación lateral debida al efecto Poisson, que se ve limitada por la camisa que le rodea, y que a su vez hace aumentar la presión hidrostática a la que el material es sometido. Todas las imágenes de este capítulo se han obtenido del artículo citado.

CAPÍTULO 5. DESARROLLO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO

5.1 INTRODUCCIÓN

Partiendo del problema propuesto por (Rittel & Dorogoy, A methodology to assess the rate and pressure sensitivity of polymers over a wide range of strain rates, 2008), se realiza el mismo análisis inicial. Del material que se quiere analizar se prepara una probeta cilíndrica de 6mm de diámetro y 6mm de altura. Esta probeta se introduce en una camisa cilíndrica de acero de diámetro interior igual al del espécimen y medio milímetro más alto. Variando el espesor de la camisa se varía la tensión de confinamiento, que en consecuencia retrasa la llegada del material al límite elástico. Para poder comparar resultados, se va a utilizar un espesor de camisa de medio milímetro, que proporciona una presión de confinamiento de unos 350MPa. El ensamblaje se completa con un actuador de 6mm de diámetro que se introduce dentro de la camisa. La presión se aplica en el actuador, que la transmite de manera uniforme a la probeta. El esquema del ensamblaje terminado se puede ver en la Figura 7.

5.2 TIPO DE ANÁLISIS

Dada la simetría del problema, se realiza un modelo axisimétrico en ABAQUS 6.13, que permitirá disminuir el tiempo computacional de simulación. El tipo de análisis es dinámico explícito. Para simular los ensayos cuasiestáticos se fija la duración de simulación en 0,01s, mientras que para la simulación de los ensayos dinámicos la duración de simulación es 120 μ s. El ensamblaje se muestra en la Figura 7 y el mallado en la Figura 6.

5.3 PROPIEDADES DEL MALLADO

El modelo se ha mallado con elementos CAX4R. Este tipo de elemento es un elemento cuadrilátero de 4 nodos, axisimétrico con integración reducida. Utilizando un tamaño medio de nodos de 0.125mm, el mallado típico que se obtiene es de 1960 elementos, 1176 de los cuales están en el espécimen a ensayar, 576 en el actuador y 208 en la camisa, como se puede ver en la Figura 6. Siguiendo la configuración experimental de referencia, no se ha realizado ningún análisis de sensibilidad de malla y se ha utilizado el tamaño medio de nodo propuesto.

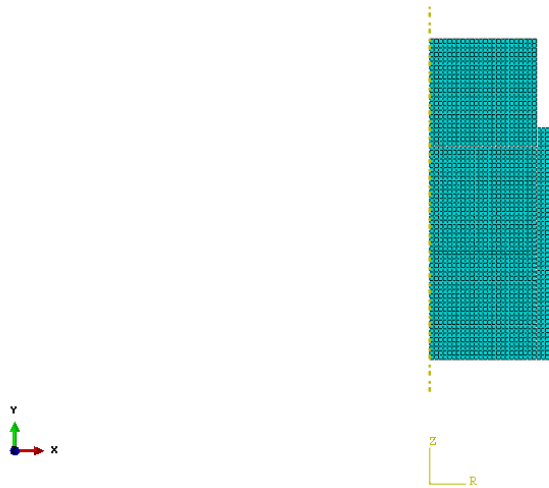


FIGURA 6. MALLADO CON ELEMENTOS CUADRILÁTEROS.

5.4 PROPIEDADES DEL MATERIAL

El material del actuador y de la camisa es el mismo acero maraging, a los que se le asigna un modelo elástico perfectamente plástico, con valores típicos que se encuentran en la literatura.

TABLA 1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS DISTINTOS MATERIALES DE CAMISA Y ACTUADOR.

Material	E (GPa)	ρ (Kg/m ³)	ν	σ_y (MPa)
Acero Maraging 300	210	8000	0.3	2250
Aluminio 6061 T651	69	2700	0.33	350

Para validar el modelo DP, se utilizan las propiedades mecánicas listadas en la Tabla 2 y el valor del ángulo de fricción $\beta = 15^\circ$, utilizado en el estudio de (Rittel & Dorogoy, A methodology to assess the rate and pressure sensitivity of polymers over a wide range of strain rates, 2008). También hay que mencionar que el ángulo de fricción interna β es un índice de sensibilidad a la presión del material. En ABAQUS, es posible introducir la dependencia del límite de fluencia respecto de la velocidad de deformación según ciertos parámetros, como los parámetros C y n de la ecuación de Johnson-Cook o siguiendo una ley potencial simple, sin embargo, se introducirán los distintos valores del límite elástico para diferentes velocidades de deformación obtenidos del mismo paper.

TABLA 2. PROPIEDADES MECÁNICAS PARA EL POLICARBONATO.

E (GPa)	ρ (Kg/m ³)	ν	σ_y (MPa)
2.2	1200	0.37	70

Para comparar las ecuaciones constitutivas, también se asignará un material que sigue el modelo de JC con los parámetros obtenidos por (Dwivedi, Bradley, & Casem, 2012) para distintas muestras de un mismo policarbonato comercial tras realizar distintos ensayos de tracción, que se recogen en la Tabla 3.

TABLA 3. PARÁMETROS DE JOHNSON-COOK PARA EL POLICARBONATO SEGÚN DWIVEDI ET AL.

A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	Tref (K)	Tmelt (K)
80	75	0.052001	2	0.548	295	562

5.5 CONDICIONES DE CONTORNO

Ya que disponemos de un modelo axisimétrico, hay que aplicar la condición de simetría radial en el eje ($r = 0$). En el contacto tangencial entre superficies se aplica un coeficiente de fricción $f = 0.3$ (Lee, Xu, & Liang, 2001), que es el mismo para el contacto acero-acero como para el contacto policarbonato-acero.

Para el caso cuasiestático se impide el movimiento en la dirección vertical de las bases del espécimen y la camisa, mientras que a superficie superior del actuador se le aplica una velocidad vertical de 0.12m/s durante una duración de $t = 0.01s$.

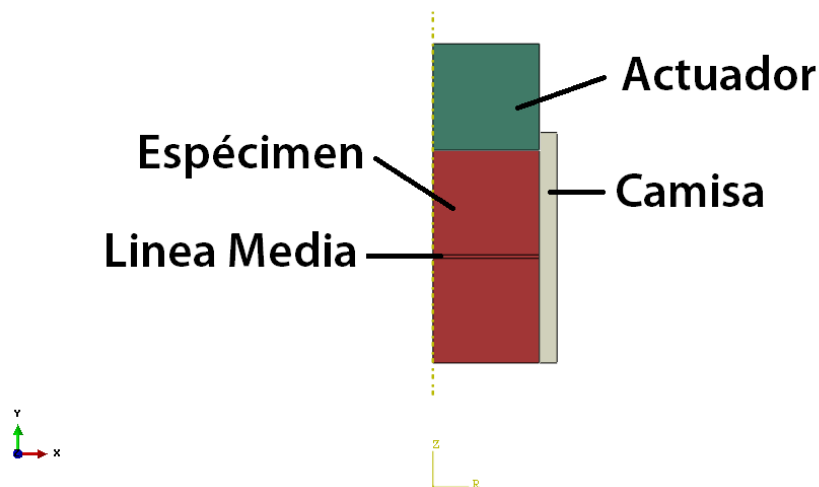


FIGURA 7. ENSAMBLAJE FINAL DEL MODELO.

Para la simulación de los casos dinámicos, se utilizan las velocidades obtenidas de los ensayos dinámicos realizados en (Rittel & Dorogoy, A methodology to assess the rate and pressure sensitivity of polymers over a wide range of strain rates, 2008), donde la velocidad medida en la parte superior del actuador y parte inferior del espécimen se digitaliza y discretiza. Posteriormente, estas velocidades se aplican como velocidades de entrada y salida a la superficie superior del actuador y a las superficies inferiores de espécimen y camisa respectivamente. Para la configuración 4 se utilizan las velocidades mostradas en la Figura 8.a y para la configuración 3 las velocidades de entrada y salida que se muestran en la Figura 8.b.

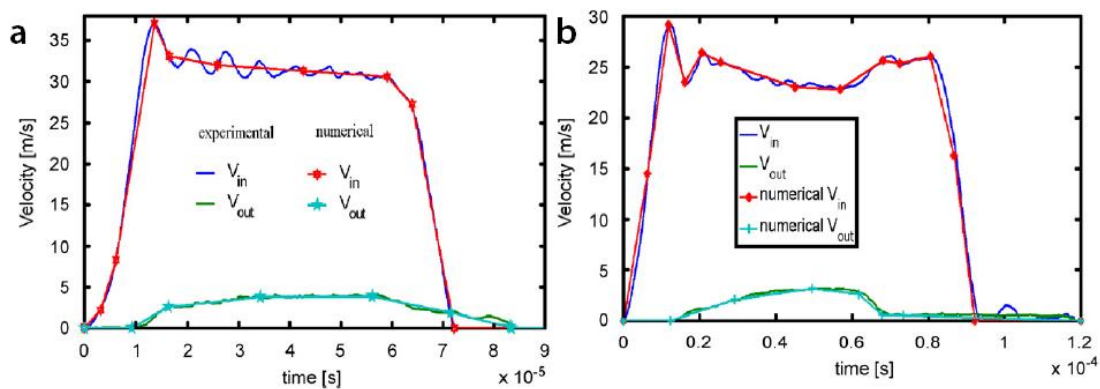


FIGURA 8. VELOCIDADES DE ENTRADA Y SALIDA PARA CASOS DINÁMICOS. PARA LA CONFIGURACIÓN 4 EL CASO A) Y PARA LA CONFIGURACIÓN 3 EL CASO B). (RITTEL & DOROGOY, A METHODOLOGY TO ASSESS THE RATE AND PRESSURE SENSITIVITY OF POLYMERS OVER A WIDE RANGE OF STRAIN RATES, 2008)

CAPÍTULO 6. COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

Con el modelo realizado, podemos proceder a analizar las tensiones que se producen y comparar los distintos casos según la presión de confinamiento y la ecuación constitutiva del espécimen a analizar. Para evaluar la tensión a la que se somete el material, se hará la media de los valores de tensión y deformación axiales verdaderas $-\sigma_{zz}$, ε_{zz} – para cada nodo situado a lo largo de la línea media y se graficará para obtener las curvas tensión verdadera – deformación verdadera y comparar.

Para validar el modelo, se realizan dos simulaciones. Con el espécimen de policarbonato sometido a una presión de confinamiento de unos 320MPa –según la ecuación (7)-, se somete al ensayo de compresión, en un caso con velocidad de deformación de $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ -Figura 9.a-, y en el otro con 4300 s^{-1} -Figura 9.b- y se comparan con las curvas experimentales obtenidas de realizar los mismos ensayos, especímenes 12 de tabla 2 y 6 de tabla 3 de (Rittel & Dorogoy, A methodology to assess the rate and pressure sensitivity of polymers over a wide range of strain rates, 2008) respectivamente.

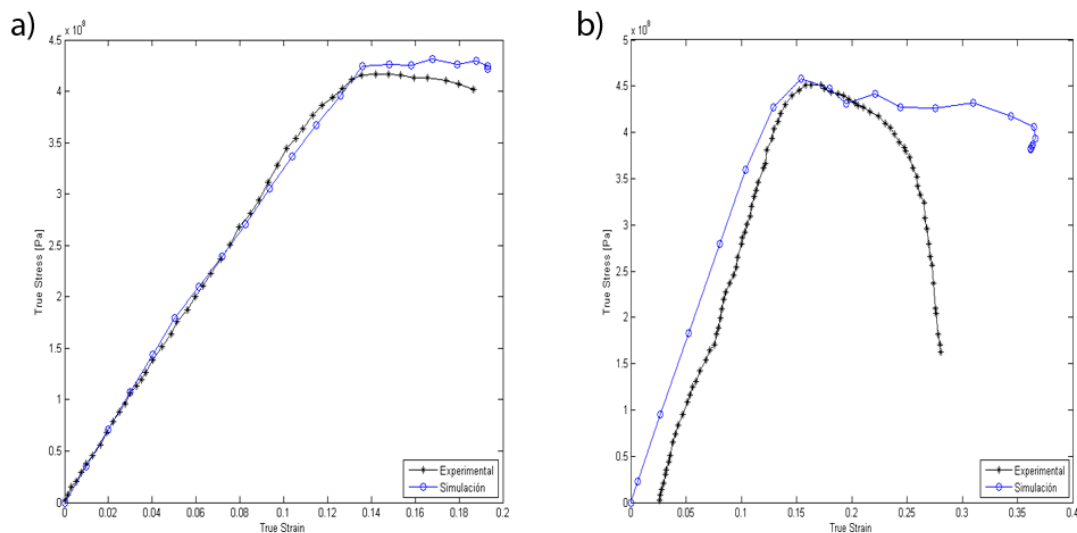


FIGURA 9. CURVAS UTILIZADAS PARA VALIDAR EL MODELO. A) ENSAYO A BAJA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN. B) ENSAYO A ALTA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN.

6.1 ECUACIÓN CONSTITUTIVA DE JOHNSON-COOK PARA EL POLICARBONATO

La ecuación de JC presentada en la ecuación (8) necesita asignar unos valores numéricos a los parámetros. De la caracterización realizada por (Dwivedi, Bradley, & Casem, 2012) obtenemos dichos valores numéricos, que aparecen recogidos en la Tabla 3, que se introducen en el software ABAQUS al definir el modelo de plasticidad, y la dependencia de la tensión con la velocidad de deformación.

6.2 CONFIGURACIONES ANALIZADAS

TABLA 4. RESUMEN DE CONFIGURACIONES ANALIZADAS

Configuración	Ensayo	Espesor de camisa (mm)	Material de camisa	Presión de confinamiento (MPa)
1	Cuasiestático	0.5	Acero	323
2	Cuasiestático	0.3	Acero	205
3	Dinámico	0.5	Acero	315
4	Dinámico	0.7	Aluminio	67

Con el modelo ya validado y con objeto de realizar una comparación más exhaustiva, se han realizado 4 configuraciones distintas, donde se analiza de manera separada la influencia de la velocidad de deformación y la presión de confinamiento – calculada según la ecuación (7)-. También se analiza la influencia de la ecuación constitutiva que se utiliza para modelar el material, ya que se incluyen, para las mismas configuraciones, las curvas obtenidas con el modelo JC. Los resultados se muestran en la Figura 10. La primera configuración es un caso estático donde mediante una camisa de 0.5mm de espesor de acero maraging se consigue una presión de confinamiento de 323MPa (Figura 10. A). La segunda configuración es también un caso estático donde la presión de confinamiento disminuye hasta los 205MPa como consecuencia de disminuir el espesor de la camisa de acero hasta los 0.3mm (Figura 10. B). La tercera configuración es un caso dinámico donde igual que en la primera, mediante una camisa de acero maraging de 0.5mm de espesor, se alcanza una presión de 315MPa (Figura 10.C). Por último, la cuarta configuración con una camisa de aluminio 6061 de espesor 0.7mm llega hasta los 67Mpa de presión de confinamiento (Figura 10. D). En la Tabla 4 se encuentran resumidas las características de cada configuración simulada.

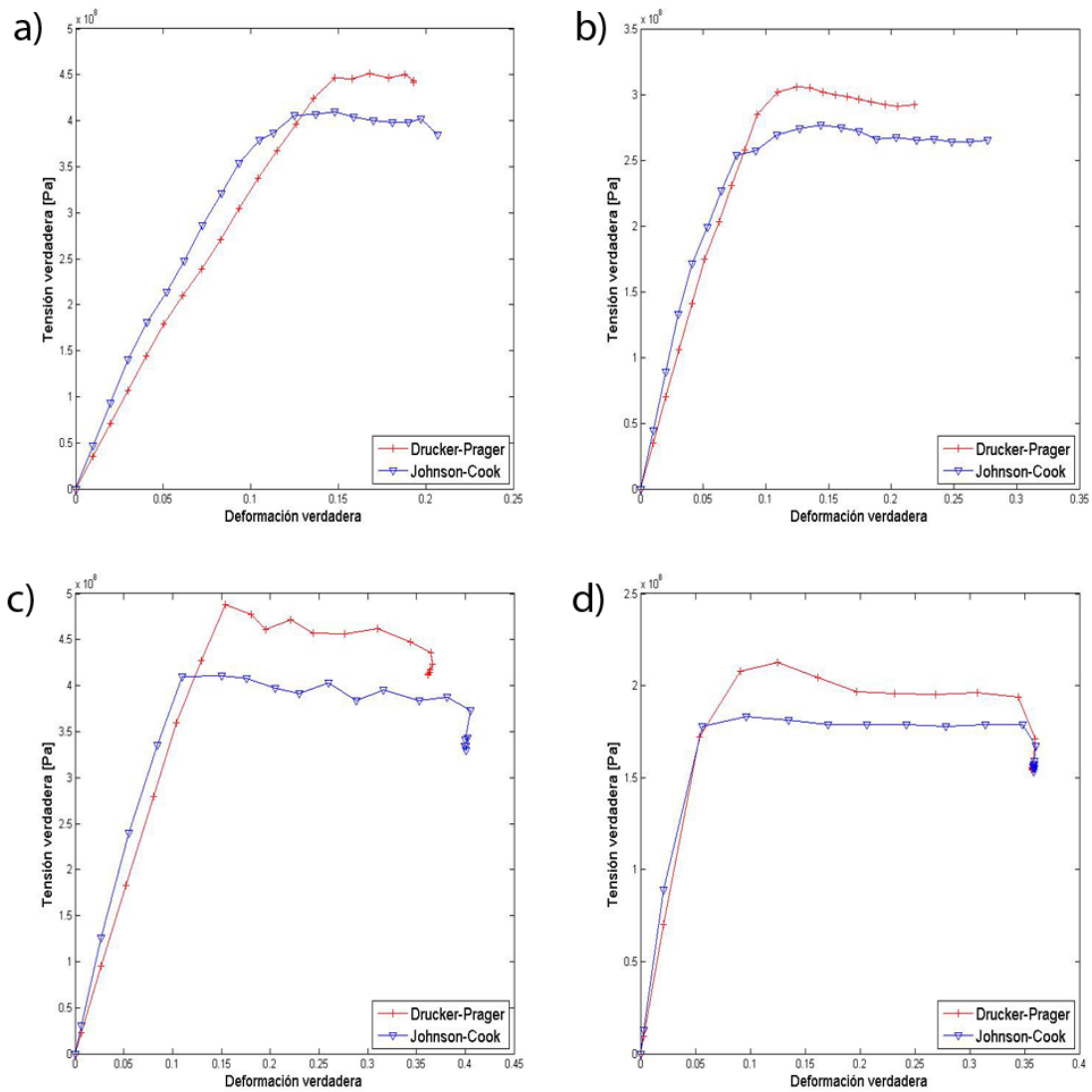


FIGURA 10. CURVAS TENSIÓN VERDADERA - DEFORMACIÓN VERDADERA PARA LAS CUATRO CONFIGURACIONES SEGÚN LOS MODELOS DE DP Y DE JC.

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

7.1 POLICARBONATO

Una vez validado el modelo, podemos pasar a los resultados obtenidos según distintas configuraciones y a analizar dichos resultados.

De la Figura 10 se pueden observar varios hechos. Se puede ver que para una misma presión de confinamiento, el policarbonato es sensible a la velocidad de deformación, ya que se retrasa la llegada del material a la fluencia, de alrededor de 450MPa en la Figura 10.a, hasta casi 500MPa en la Figura 10.c, un aumento del 11%.

También se ve cómo es posible duplicar la resistencia del material aumentando la presión de confinamiento, de 67MPa a 315MPa –Figura 10 c y d-, y de aumentar el límite de fluencia de 300MPa hasta 450MPa aumentando la presión de confinamiento en 100MPa -Figura 10 a y b-, lo que demuestra la sensibilidad de los polímeros a la presión hidrostática a la que son sometidos, como se había postulado anteriormente de manera teórica en el apartado 3.1.4 Comparación de ecuaciones constitutivas.

Se pueden ver también diferencias en cómo se deforman los especímenes en un mismo ensayo a alta velocidad de deformación en la Figura 11 y en la Figura 12.

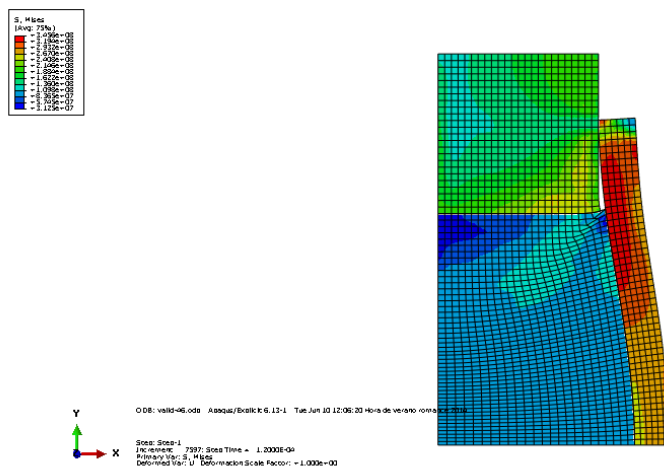


FIGURA 11. ESPÉCIMEN DEFORMADO SEGÚN EL MODELO DP

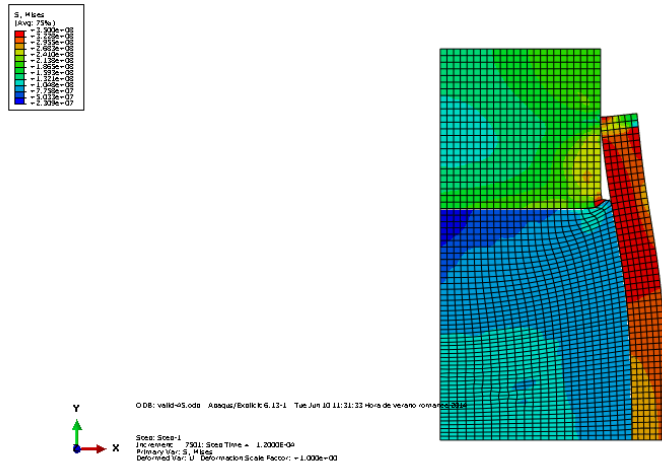


FIGURA 12. ESPÉCIMEN DEFORMADO SEGÚN EL MODELO JC

En la Figura 12, el modelo JC se muestra más deformado que el modelo DP de la Figura 11. También se ve como la distribución de la tensión también es ligeramente distinta, en el modelo JC es algo menos uniforme que en el modelo DP.

Comparando ecuaciones constitutivas se comprueba como un modelo JC tan utilizado en según qué campos, no es válido para este problema de modelado de polímeros frágiles, ya que la rigidez del régimen elástico puede verse falseada en algunos casos -Figura 10.a- y la tensión máxima que se alcanza es de media un 15% menor que la alcanzada con el modelo DP, que sí que tiene en cuenta la influencia de la presión hidrostática, por lo que se subestima de manera sustancial la fluencia del material.

7.2 EXTENSIÓN DEL PROBLEMA A OTRO POLÍMERO

TERMOPLÁSTICO: ABS

Una vez que se han tomado todas las decisiones relativas al tipo de problema a analizar, condiciones de contorno, geometría del problema, mallado y tipo de simulación, es fácil extender el modelo a otros polímeros para observar más a fondo el tipo de diferencias que existen entre las ecuaciones constitutivas y certificar que el del policarbonato no es un caso aislado y que lo podemos extender a los demás polímeros termoplásticos.

En este apartado se va a volver a repetir el estudio realizado para el policarbonato, con los mismos ensayos y configuraciones pero para el polímero ABS.

El acronitrilo butadieno estireno o ABS es un polímero termoplástico que presenta una gran resistencia a impactos y está muy presente en las grandes industrias automovilísticas. Debido a sus buenas propiedades mecánicas encuentra aplicaciones

en elementos protectores como cascos, en palos de golf o canoas, lo que lo hace un candidato excelente para extender el estudio aquí realizado.

Buscando en la bibliografía se han encontrado los parámetros de ambos modelos que se han utilizado aquí para el polímero propuesto. Para el modelo de Drucker-Prager se han utilizado los parámetros de (Dean & Wright, 2003) y se encuentran en la Tabla 5. Como ya se había nombrado en el apartado 3.1.3 Modelo Johnson-Cook J2, también se ha caracterizado el ABS según el modelo de Johnson-Cook, y como se había mencionado anteriormente, se utilizarán las variables de (Louche, Pierre-Coudol, Arrieux, & Issartel, 2008) que se presentan en la Tabla 6.

TABLA 5. PARÁMETROS DEL MODELO DRUCKER-PRAGER PARA EL ABS

E (GPa)	ν	P (kg/m³)	β	σ_c (MPa)
2.3	0.39	1050	57.17°	52

Donde β es el ángulo de presión, y σ_c es el límite de fluencia a compresión del material.

TABLA 6. PARÁMETROS DEL MODELO DE JOHNSON-COOK PARA EL ABS

A (MPa)	B (MPa)	C	n	$\dot{\epsilon}_0$
39	48	0.053	1.5	8·10 ⁻⁴

Para el modelo de Johnson-Cook, los parámetros de entrada presentados en la Tabla 6 han de ser combinados con los valores de módulo elástico, densidad y coeficiente de Poisson que se listan en la Tabla 5.

Una vez que se introducen los materiales en el software ABAQUS, se reproduce el modelo ya desarrollado anteriormente, con la misma geometría, mismas condiciones de contorno, mismo tipo de análisis y misma malla.

Realizando las simulaciones de las mismas 4 configuraciones que se han utilizado para analizar el policarbonato, obtenemos las gráficas que siguen:

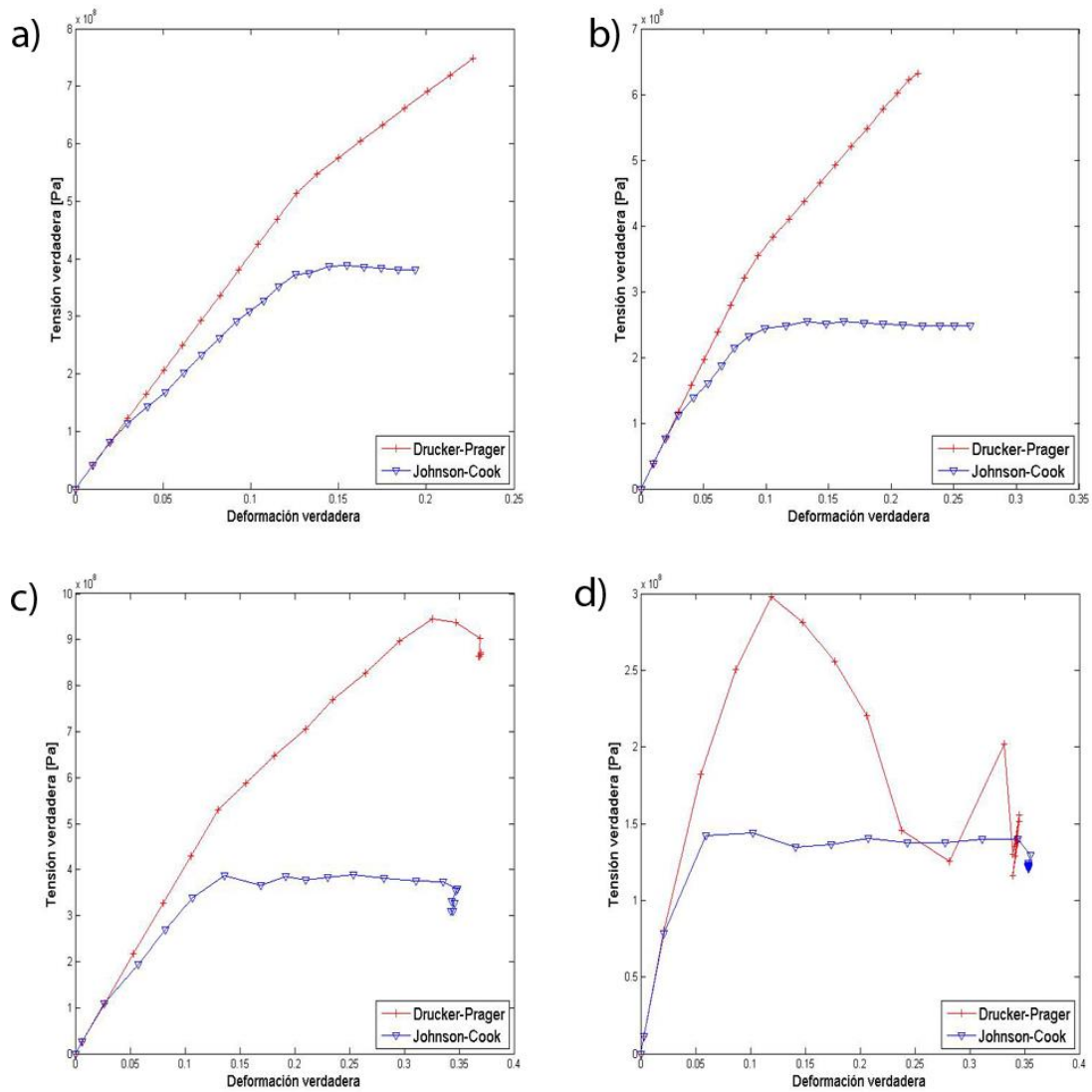


FIGURA 13. CURVAS DE TENSIÓN VERDADERA - DEFORMACIÓN VERDADERA DE LAS CUATRO CONFIGURACIONES PARA EL ABS

De la misma manera que anteriormente, la Figura 13.a corresponde a la configuración 1, la Figura 13.b a la configuración 2, la Figura 13.c a la configuración 3 y la Figura 13 a la configuración 4.

Se puede observar como con la mayor sensibilidad a la presión del ABS frente al policarbonato -57.17° de ángulo de presión frente a 15° del policarbonato- aumenta la subestimación de la tensión alcanzada según el modelo JC frente a la alcanzada según el modelo DP. Incluso en los casos estáticos, a) y b), mientras que en el modelo JC el material entra en régimen plástico y endurece de la manera típica, el modelo DP no llega a entrar en régimen plástico a pesar de disminuir ligeramente su rigidez inicial.



Por su parte, en los casos dinámicos, c) y d), según el modelo DP sí que se alcanza la plastificación, aunque ésta es alcanzada mucho más tarde, tanto en tensión como en deformación, frente a lo que ocurre en el modelo JC.

En conclusión, se confirma cómo el modelo de Johnson-Cook por su falta de sensibilidad a la presión, subestima la respuesta de los polímeros termoplásticos en problemas de impacto, y esta subestimación aumenta según el ángulo de presión del material –responsable de señalar la sensibilidad a la presión–.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

8.1 CONCLUSIONES

Una vez realizado el análisis de los datos obtenidos mediante la simulación, se procede a listar las conclusiones a las que se han llegado en este trabajo.

- Desde la formulación matemática de las dos ecuaciones constitutivas comparadas, se ven las diferencias de hipótesis desde la que parte cada una, siendo especialmente notable la omisión de la influencia de la presión hidrostática en la ecuación de JC. Sin embargo, dada la amplia popularidad que tiene en el mundo científico, y su facilidad para introducir en softwares de simulación, es provechoso utilizarlo para comparar distintos modelos.
- Para analizar problemas de impacto a baja velocidad, como el que podría ocurrir al caerse un teléfono móvil de una mesa, la configuración aquí propuesta es de las más apropiadas, ya que ayuda a aumentar las tensiones que se alcanzan en el material.
- El modelo Drucker-Prager tiene en cuenta de manera conveniente la influencia de la presión, por lo que es apropiado para realizar este tipo de ensayos y recomendado por su preimplementación en el software ABAQUS.
- El modelo de Johnson-Cook, aunque sea ampliamente usado en la industria, no es válido en esta ocasión para predecir de manera adecuada el comportamiento de un polímero termoplástico como es el policarbonato. Los resultados que se obtienen mediante su empleo subestiman en todas las configuraciones analizadas las capacidades reales del material.

Por lo tanto, se desaconseja el uso del modelo Johnson-Cook para polímeros termoplásticos frágiles sometidos a procesos de impacto, mientras que el modelo Drucker-Prager es de los más convenientes a utilizar, ya que predice el comportamiento de manera correcta y se encuentra ya preimplementado en ABAQUS, ayudando a acortar significativamente el tiempo de desarrollo del modelo numérico.



8.2 TRABAJOS FUTUROS

Una vez comprobada la idoneidad de la ley de comportamiento utilizada, se puede utilizar la metodología y modelo aquí presentados para realizar predicciones de comportamiento de estructuras frente a impactos.

Partiendo del trabajo realizado aquí, y siguiendo con la línea de la protección de dispositivos de telefonía móvil, se podrá seguir analizando distintos materiales que puedan ser utilizados en el protector. Se puede experimentar con el grosor óptimo de material, analizar la influencia del adhesivo durante el impacto. También se podrá analizar distintos modelos constitutivos a los estudiados aquí, y ver si existen otros que ofrezcan unos mejores resultados.

APÉNDICE I: PRESUPUESTO

En el presente apéndice se realiza un presupuesto aproximado de la realización del trabajo atendiendo a dos grupos de conceptos. El primer concepto engloba a los relacionados con los recursos humanos: trabajo del autor y dedicación del equipo del proyecto principalmente. El segundo corresponde a los costes de material utilizado a lo largo del proyecto.

RECURSOS HUMANOS

La principal fuente de gastos en los que se ha incurrido en este aspecto son las horas dedicadas por el autor para la realización del trabajo, que se pueden desglosar aproximadamente de la manera que se describe en la Tabla 7.

TABLA 7. DESGLOSE APROXIMADO DE LAS HORAS DEDICADAS POR EL AUTOR

Concepto	Horas
<i>Investigación y búsqueda de información</i>	120
<i>Realización de simulaciones numéricas</i>	120
<i>Reuniones con el equipo del proyecto</i>	16
<i>Redacción de la memoria</i>	80
TOTAL HORAS DE AUTOR	336

Las horas de investigación y búsqueda de información y de realización de simulaciones numéricas se corresponden aproximadamente a 15h de trabajo semanal durante un período de 2 meses, mientras que la redacción de la memoria corresponde a un trabajo semanal de 20h durante un mes.

Aproximando el salario del autor al de un ingeniero junior, con un salario medio de 2150€ mensuales -13.43€/hora-, y siendo el salario del ingeniero senior de 4500€ mensuales -28.12€/hora-, los costes de recursos humanos quedan como lo mostrado en la Tabla 8.

TABLA 8. COSTE DE RECURSOS HUMANOS EN EL PROYECTO

<i>Concepto</i>	<i>Horas</i>	<i>Coste unitario</i>	<i>Coste total</i>
<i>Ingeniero Junior</i>	336	13.43	4512.48
<i>Ingeniero Senior</i>	16	28.12	449.92
Total			4962.4

MATERIAL UTILIZADO

Los materiales utilizados que incurren en gastos son principalmente 2: El ordenador portátil utilizado por el autor para la investigación bibliográfica, simulación numérica y redacción de la memoria, y la licencia del software de elementos finitos ABAQUS.

El ordenador portátil es un ordenador de la marca Toshiba serie Satellite L655. Con un coste de 642€ y un período de amortización de 4 años, aporta en el coste del proyecto de la manera que se especifica en la ecuación (7).

$$C_{Amort} = \frac{C_{Total}}{T_{Amort}} \cdot duración\ proyecto = \frac{642€}{48\ meses} \cdot 5\ meses = 67€ \quad (7)$$

Las licencias de ABAQUS que son necesarias comprar para realizar el análisis que se ha realizado aquí son las licencias de ABAQUS Explicit y ABAQUS CAE, que tienen un coste aproximado de 450€, lo que hace que los costes del material utilizado sumen un total de 517€.

Finalmente, sumando los costes de recursos humanos -4962.4€- y los del material utilizado -517€-, este proyecto ha tenido un coste aproximado de **5479.4€**.





BIBLIOGRAFÍA

- Bardia, P., & Narasimhan, R. (2006). Characterisation of pressure-sensitive yielding in polymers. *Strain*(42), 182-196.
- Basu, B., Tiwari, D., Kundu, D., & Prasad, R. (2009). Is Weibull distribution the most appropriate statistical strength distribution for brittle material? *Ceramics International*(35), 237-246.
- Bloomberg. (Febrero de 2014). *Bloomberg*. Obtenido de <http://www.bloomberg.com/video/watch-glass-bend-the-future-for-smartphones-hI1Y57AiSoWGk2T9Mbi2Zw.html>
- Cadell, R., Raghava, R., & Atkins, A. (1974). Pressure dependent yield criteria for polymers. *Material Science and Engineering*, 113-120.
- Clough, R. W. (2004). Early history of the finite element method from the view point of a pioneer. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 283-287.
- CNET. (Febrero de 2013). *CNET*. Obtenido de <http://www.cnet.com/uk/news/quarter-of-iphones-have-a-broken-screen-says-new-poll/>
- CNMC. (Febrero de 2014). *Indicadores ONTSI*. Obtenido de <http://www.ontsi.red.es/ontsi/es/indicador/evoluci%C3%B3n-del-n%C3%BAmero-de-clientes-de-telefon%C3%ADa-m%C3%B3vil-en-espa%C3%B1a>
- Dean, G., & Wright, L. (2003). An evaluation of the use of finite element analysis for predicting the deformation of plastics under impact loading. *Polymer Testing*, 625-631.
- Dwivedi, A., Bradley, J., & Casem, D. (2012). Mechanical Response of Polycarbonate with Strength Model Fits. *Army Research Laboratory*.
- Felippa, C. A. (2004). *Introduction to Finite Element Methods*. Boulder, Colorado. Obtenido de <http://www.colorado.edu/engineering/cas/courses.d/IFEM.d/IFEM.AppO.d/IFEM.AppO.pdf>
- Forquin, P., Arias, A., & Zaera, R. (2008). Role of porosity in controlling the mechanical and impact behaviours of cement-based materials. *International Journal of Impact Engineering*, 133-146.
- Ghorbel, E. (2008). A viscoplastic constitutive model for polymeric materials. *International Journal of Plasticity*(24), 2032-2058.
- IDC. (Enero de 2014). *IDC*. Obtenido de <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS24645514>
- Lauzon, M. (Mayo de 2012). *Plastics News*. Obtenido de [plasticsnews.com: http://www.plasticsnews.com/article/20120504/NEWS/305049956](http://www.plasticsnews.com/article/20120504/NEWS/305049956)
- Lee, J., Xu, G., & Liang, H. (2001). Experimental and numerical analysis of friction and wear behaviour of polycarbonate. *Wear*, 1541-1556.



- Louche, H., Pierre-Coudol, F., Arrieux, R., & Issartel, J. (2008). An experimental and modeling study of the thermomechanical behaviour of an ABS polymer structural component during and impact test. *International Journal of Impact Engineering*(36), 847-861.
- Lubliner, J. (1990). *Plasticity Theory*. Collier Macmillan Publishers.
- MacRumors. (Marzo de 2013). *MacRumors*. Obtenido de <http://www.macrumors.com/2013/03/21/future-smartphone-displays-may-use-sapphire-instead-of-glass/>
- Patzák, B. (18 de Febrero de 2014). *OOFEM.ORG*. Recuperado el Julio de 2014, de Material Model Library Manual: <http://www.oofem.org/resources/doc/matlibmanual/matlibmanual.pdf>
- Rittel, D., & Brill, A. (2008). Dynamic flow and failure of confined polymethylmethacrylate. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 56(4), 1401-1416.
- Rittel, D., & Dorogoy, A. (2008). A methodology to assess the rate and pressure sensitivity of polymers over a wide range of strain rates. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 3191-3205.
- Squaretrade. (Septiembre de 2012). *Squaretrade*. Obtenido de <http://blog.squaretrade.com/2012/09/americans-have-spent-59-billion-on-damaged-iphones.html>
- Yazid, A., Abdelkader, N., & Abdelmadjid, H. (2009). A state-of-the-art review of the X-FEM for computational fracture mechanichs. *Applied Mathematical Modellin*(33), 4269-4282.